
Обчислювальні методи в радіоелектроніці

УДК 621.396

ЕНТРОПІЙНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РАДІОКЕРУВАННЯ¹**Бичковський В. О., к.т.н., доцент****Реутська Ю. Ю., асистент***Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна, reutska_rtf@ukr.net***THE ENTROPY ANALYSIS OF RADIO CONTROL PROCESS*****Bychkovskiy V. O., Cand. of Sci. (Techn.), associate prof.******Reutska Yu. Yu., assistant****National Technical University of Ukraine**“Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, reutska_rtf@ukr.net***Вступ**

Сучасний етап розвитку техніки та технологій характеризується широким застосуванням систем радіокерування (СРК) в промисловості, на транспорті, у разі проведення наукових досліджень та у військовій справі [1]. Дослідження СРК та процесу радіокерування проводяться різноманітними методами, які базуються як на мікроскопічному, так і макроскопічному підходах. Макроскопічний аналіз дає можливість розглянути процес радіокерування в цілому та перейти від випадкових внутрішньосистемних мікровзаємодій до деякого регулярного опису, що цілком відповідає загальній методології досліджень складних систем та процесів. Виходячи із сучасних наукових концепцій процеси радіокерування розгортаються у просторі і часі та нерозривно пов'язуються з процесами перетворення речовини, енергії та інформації. Таким чином, стає зрозумілою доцільність використання математичного апарату теорії інформації для аналізу процесу радіокерування на макроскопічному рівні [2, 3]. Статичний підхід до таких задач є досить відомим і базується на визначенні кількості інформації I , яку необхідно ввести в контур керування для зменшення ентропії об'єкта керування від деякого початкового значення H_0 до кінцевого значення H_y [4, 5]. Отже, ентропія H_y визначає точність керування та може бути вираженою через абсолютну або відносну помилку керування [6]. Перехід на якісно новий рівень аналізу передбачає використання динамічних моделей. В цьому випадку представляється можливим встановити необхідний час керування, закономірності зменшення ентропії об'єкту керування, співвідношення між основними показниками процесу керування. Оскільки саме ентропія характеризує точність керування, то доцільно скласти рівняння

¹ <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1156>

динаміки таким чином, щоб в процесі макроскопічного аналізу визначити не тільки помилку керування, а й обмеження на значення ентропії та пов'язати їх з основними характеристиками каналу радіокерування.

Постановка задачі

Прийmemo до уваги, що при всій різноманітності СРК їх поєднує одна загальна риса: ентропія $H = H(t)$ об'єкту керування або процесу цілеспрямовано зменшується завдяки надходженню керуючої інформації $I = I(t)$. Ентропія H є об'єктивною характеристикою точності керування, а інформація I складається з початкової та робочої інформації [5]. Початкову інформацію утворює сукупність заздалегідь зібраних даних про властивості об'єкта керування, збурюючих впливах та інших факторів. Робоча інформація добувається в процесі керування. Необхідна кількість інформації для зменшення ентропії об'єкту керування від H_0 до H_y визначається за формулою

$$I = H_0 - H_y,$$

яка не дає можливості розглянути процес радіокерування в динаміці. Отже, необхідно скласти динамічну модель процесу радіокерування, яка розкриває закономірності зміни ентропії об'єкту керування як в умовах відсутності так і наявності керуючої інформації. В процесі розв'язання поставленої задачі необхідно прийняти до уваги, що як величина ентропії об'єкту керування, так і кількість керуючої інформації досягають певної обмеженої величини. Окрім цього, модель повинна давати можливість враховувати основні радіотехнічні характеристики каналу керування об'єктом.

Теоретичні викладки

Введення необхідної кількості інформації I в контур керування має метою зменшення ентропії H від початкового значення H_0 до деякого мінімального значення H_y , яке характеризує точність керування. Якщо відключити керування, то під впливом збурень ентропія буде збільшуватися. У разі відновлення керування ентропія починає зменшуватися, а її стало значення можна розглядати як оцінку точності керування [5]. Нехай H_m — потенційно можливе значення ентропії за відсутністю керування, K_1 — константа швидкості зростання H . Оскільки ентропія зростає та асимптотично наближається до свого потенційно можливого значення H_m , то можна записати

$$dH = K_1(H_m - H)dt.$$

Нехай кількість керуючої інформації, яка вводиться в контур керування, постійно зростає та асимптотично наближається до свого потенційно

можливого значення I_m . Якщо K_2 — константа швидкості зростання I , то рівняння динаміки приймає наступний вигляд:

$$\frac{dH}{dt} = K_1(H_m - H) - K_2(I_m - I). \quad (1)$$

Збільшення кількості керуючої інформації на величину x супроводжується зменшенням ентропії на величину x . В умовах позаштатної ситуації, тобто у разі зменшення керуючої інформації на величину x , спостерігається збільшення ентропії на величину x . Таким чином,

$$H = H_0 - ax, \quad I = I_0 + ax, \quad (2)$$

де $a=1$ в умовах керування, $a=-1$ в умовах позаштатної ситуації (порушення керування). На підставі рівнянь (1), (2) запишемо:

$$\frac{dx}{dt} = (K_1 + K_2)(b - x), \quad (3)$$

де величина b визначається з умови

$$b = \frac{K_2(I_m - I_0) - K_1(H_m - H_0)}{a(K_1 + K_2)}. \quad (4)$$

Запишемо рівняння (3) у вигляді

$$\frac{dx}{dt} + (K_1 + K_2)x = (K_1 + K_2)b$$

та домножимо його ліву та праву частину на $\exp(K_1 + K_2)t$.

Тоді можна записати

$$\frac{d}{dt}[x \exp(K_1 + K_2)t] = (K_1 + K_2)b \exp(K_1 + K_2)t \quad (5)$$

Інтегрування рівняння (5) по x від 0 до x та по t від 0 до t дає наступний результат:

$$x = b[1 - \exp(-(K_1 + K_2)t)]. \quad (6)$$

На підставі формули (6) визначаємо стає значення x :

$$x_{\text{ст}} = \lim_{x \rightarrow \infty} x(t) = b. \quad (7)$$

Значення $x_{\text{ст}}$ можна визначити через досить великий проміжок часу спостережень за поведінкою системи. На підставі формул (4), (7) визначимо

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{H_m - H_0 + ax_{\text{ст}}}{I_m - I_0 - ax_{\text{ст}}}. \quad (8)$$

На підставі формул (2), (4), (6) складаємо рівняння ентропійного балансу в системі радіокерування у разі $a=1$, тобто у разі організації керуючого

процесу

$$H = H_0 - \Delta H, \quad (9)$$

де ΔH визначається з умови:

$$\Delta H = \frac{1}{K_1 + K_2} [K_2(I_m - I_0) - K_1(H_m - H_0)][1 - \exp(-(K_1 + K_2)t)]. \quad (10)$$

В умовах позаштатної ситуації спостерігається зрив керування ($a = -1$). Тоді рівняння ентропійного балансу на підставі формул (2), (4), (6) приймає наступний вигляд:

$$H = H_0 + \Delta H, \quad (11)$$

Аналіз формул (9), (10) показує, що для організації керуючого процесу необхідно виконати умову

$$I_m - I_0 > \frac{K_1(H_m - H_0)}{K_2}. \quad (12)$$

Прийmemo до уваги, що $I_m = \ln N_m$, $I_0 = \ln N_0$, де N_m , N_0 — інформаційні спроможності [6, 7]. Тоді на підставі формули (12) знаходимо відношення інформаційних спроможностей

$$\frac{N_m}{N_0} > \exp\left[\frac{K_1(H_m - H_0)}{K_2}\right]. \quad (13)$$

Прийmemo до уваги, що $N_m = 1/l\gamma_m$, $N_0 = 1/l\gamma_0$, де γ_m , γ_0 — відносні помилки радіокерування. Коефіцієнт l залежить від щільностей ймовірностей керуючого сигналу та абсолютної помилки [7]. Отже на підставі формули (13) визначаємо

$$\gamma_m < \gamma_0 \exp\left[-\frac{K_1(H_m - H_0)}{K_2}\right].$$

Однією із актуальних задач аналізу процесу радіокерування є з'ясування часу $t = t_0$, необхідного для забезпечення ентропії $H = 0$. На підставі формули (9) визначаємо, що в цьому випадку $\Delta H = H_0$. Отже, враховуючи залежність (10), знаходимо необхідний час керування

$$t_0 = \frac{1}{K_1 + K_2} \ln \frac{K_2(I_m - I_0) - K_1(H_m - H_0)}{K_2(I_m - I_0) - K_1(H_m - H_0) - (K_1 + K_2)H_0}. \quad (14)$$

Значення t_0 не може бути від'ємною величиною. Аналіз формули (14) показує, що тоді одночасно з умовою (12) необхідно виконати також умову

$$K_2(I_m - I_0) - K_1(H_m - H_0) - (K_1 + K_2)H_0 > 0. \quad (15)$$

На підставі формули (15) визначаємо

$$I_m - I_0 > \frac{K_1 H_m}{K_2} + H_0. \quad (16)$$

Тоді можна записати

$$\frac{N_m}{N_0} > \exp\left(\frac{K_1 H_m}{K_2} + H_0\right), \quad (17)$$

$$\gamma_m < \gamma_0 \exp\left[-\left(\frac{K_1 H_m}{K_2} + H_0\right)\right]. \quad (18)$$

Розглянемо окрему ситуацію, коли у разі $I_0 = 0$ ентропія об'єкту керування має значення, наближене до H_m , тобто $H_0 \approx H_m$. Тоді на підставі формули (16) визначаємо

$$I_m > \left(1 + \frac{K_1}{K_2}\right) H_0. \quad (19)$$

Нехай t_n — час передачі інформації в каналі керування об'єктом ($t_n \leq t_0$), C_n — швидкість передачі інформації по каналу керування. Якщо C - пропускна спроможність каналу, то $C_n < C$. Таким чином, за потенційно можливе максимальне значення кількості інформації I_m можна взяти величину $I_m = C t_n$

На підставі формули (12) визначаємо необхідний час передачі інформації в каналі керування

$$t_n > \frac{1}{C} \left(\frac{K_1 (H_m - H_0)}{K_2} + I_0 \right). \quad (20)$$

Пропускна спроможність каналу визначається з формули

$$C = F \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (21)$$

де F — смуга пропускання каналу, P_c — потужність сигналу, $P_{\text{ш}}$ — потужність шуму. Таким чином, на підставі формул (20), (21) можна визначити вимоги до часу t_n . Якщо t_n задається, то представляється можливим встановити обмеження на величину H_m . На підставі формули (20) знаходимо

$$H_m < \frac{K_2}{K_1} (C t_n - I_0) + H_0.$$

Розглянемо ситуацію, коли в процесі радіокерування ставиться задача забезпечити $H = 0$. Тоді на підставі формули (16) приймаючи до уваги, що $I_m = C t_n$, визначаємо необхідний час передачі інформації в каналі керування

$$t_n > \frac{1}{C} \left(\frac{K_1 H_m}{K_2} + H_0 + I_0 \right). \quad (22)$$

Якщо t_n задається, то можна визначити обмеження на максимальне значення ентропії. На підставі формули (22) знаходимо

$$H_m < \frac{K_2}{K_1} (C t_n - H_0 - I_0).$$

Тоді за умови, коли $I_0 = 0$ ентропія об'єкту керування $H_0 \approx H_m$, визначаємо

$$t_n > \frac{H_m}{C} \left(1 + \frac{K_1}{K_2} \right). \quad (23)$$

Якщо t_n задається, то можна знайти обмеження на максимальне значення ентропії. На підставі формули (23) визначаємо

$$H_m < \frac{K_2 C t_n}{K_1 + K_2}.$$

Таким чином, на підставі процедури ентропійного аналізу встановлено обмеження на відносні помилки радіокерування, необхідний час керування та максимальне значення ентропії об'єкта керування. У разі цього враховується смуга пропускання каналу керування, потужність сигналу та потужність шуму.

Висновки

На підставі запропонованої динамічної моделі проведено ентропійний аналіз процесу радіокерування, що дало можливість:

1. Встановити залежність між ентропією об'єкту керування та кількістю інформації, яка надходить в канал керування.
2. Визначити необхідний час керування та обмеження на час передачі інформації в каналі керування.
3. Врахувати радіотехнічні параметри каналу радіокерування — смугу пропускання каналу, потужність сигналу та потужність шуму.
4. Визначити відносну помилку радіокерування та її залежність від діапазону зміни ентропії об'єкту керування.

Отримані результати дають можливість прогнозувати ефективність систем радіокерування на початковому етапі їх проектування.

Перелік посилань

1. Меркулов В. И. Авиационные системы радиоуправления. Том 1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа. / Под ред. А. И. Конащенкова, В. И. Меркулова. — М. : Радиотехника, 2003. — 192 с.
2. Бичковський В. О. Макроскопічний аналіз задачі радіокерування / В. О. Бичковський, Ю. Ю. Реутська // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоа-

паратобудування. – 2014. – №55. – с. 89-96.

3. Згуровський М. З. Основи системного аналізу / М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова. – К. : Видавнича група BHV, 2007. – 544 с.

4. Коган И. М. Теория информации и проблемы ближней радиолокации. – М. : Сов. радио, 1968. – 144 с.

5. Красовский А. А. Динамика непрерывных самонастраивающихся систем. – М. : Физматгиз, 1963. – 468 с.

6. Бычковский В. А. Авиационные системы радиоуправления. – К. : КВВАИУ, 1985. – 100 с.

7. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. – М. : Энергия, 1968. – 248 с.

References

1. Konashchenkova A. I. eds. and Merkulova V. I. (2003) *Aviatsionnye sistemy radioupravleniya. Tom 1. Printsipy postroeniya sistem radioupravleniya. Osnovy sinteza i analiza* [Airport radio systems. Volume 1. Principles of radio control systems. Basics of synthesis and analysis]. Moscow, Radiotekhnika, 192 p.

2. Bychkovskiy, V. O., Reutskaya, Yu. Yu. (2013) The macroscopic analysis of radio – control problem. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.*, no. 55, pp. 89-96. (in Ukrainian)

3. Zhurovskiy M. Z. and Pankratova N. D. (2007) *Osnovy systemnoho analizu* [Fundamentals of Systems Analysis], Kyiv, BHV Publ., 544 p.

4. Kogan I. M. (1968) *Teoriya informatsii i problemy blizhnei radiolokatsii* [Information Theory and problems of short-range radar]. Moscow, Sov. radio, 144 p.

5. Krasovskii A. A. (1963) *Dinamika nepreryvnykh samonastroyayushchikhsya sistem* [The dynamics of continuous self-adjusting systems]. Moscow, Fizmatgiz, 468 p

6. Bychkovskii V. A. (1985) *Aviatsionnye sistemy radioupravleniya* [Airport radio systems]. Kiev, KVVAIU, 100 p.

7. Novitskii P. V. (1968) *Osnovy informatsionnoi teorii izmeritel'nykh ustroystv* [Fundamentals of information theory of measurement devices]. Moscow, Energiya, 248 p.

Бичковський В. О., Реутська Ю. Ю. Ентропійний аналіз процесу радіокерування. На підставі макроскопічного підходу до аналізу процесу радіокерування запропоновано динамічну модель, яка враховує співвідношення між швидкістю зміни ентропії об'єкту керування та кількістю інформації, що надходить по каналу керування. Враховано константу швидкості зростання ентропії об'єкту у разі відсутності керування та константу швидкості зменшення ентропії в умовах організації процесу керування.

Враховуються обмеження на потенційно можливі значення ентропії та кількість інформації. Проаналізовано ситуацію сталого режиму. Встановлено час, через який процес керування може бути завершений. Визначено умову на співвідношення між потенційно можливим значенням ентропії та кількістю інформації. Встановлено залежність між відносною помилкою радіокерування, значенням ентропії об'єкту керування та початковою інформацією. В почасових та ентропійних обмеженнях на процес радіокерування враховані смуга пропускання каналу керування, потужність сигналу та потужність шуму.

Ключові слова: радіокерування, ентропія, інформація.

Бычковский В. А., Реутская Ю. Ю. Энтропийный анализ процесса радиоуправления. На основании макроскопического подхода к анализу процесса радиоуправления

предложена динамическая модель, которая учитывает соотношения между скоростью изменения энтропии объекта управления и количеством информации, которая поступает по каналу управления. Учтена константа скорости увеличения энтропии объекта при отсутствии управления и константа скорости уменьшения энтропии в условиях организации процесса управления.

Учитываются ограничения на потенциально возможные значения энтропии и количества информации. Проанализирована ситуация установившегося режима. Установлено время, за которое процесс управления может быть завершен. Определено требование к соотношению между потенциально возможным значением энтропии и количеством информации. Установлена зависимость между относительной ошибкой радиоуправления, значением энтропии объекта управления и начальной информацией. Во временных и энтропийных ограничениях на процесс радиоуправления учтены полоса пропускания канала управления, мощность сигнала и мощность шума.

Ключевые слова: радиоуправление, энтропия, информация.

Bychkovskyi V.O., Reutskaya Yu. Yu. The entropy analysis of radio control process.

Introduction. Macroscopic analysis makes it possible to consider the radio control process as a whole and go from casual to regular for studies of complex systems and processes. The transition to a qualitatively new level of analysis involves the dynamic models use. In this case it is possible to set the required control time, laws to reduce the entropy of the control object, the relationship between the main parameters of the process control.

Problem statement. Entropy is the objective characteristic of control precision. The collection of previously collected data on the properties of the control object, disturbances and other factors form the original information. Working information is extracted in the control process. The required amount of information to reduce the control object entropy it enables to consider the process of radio control in the dynamics. The radio control dynamic model (the dynamic equation), which reveals the laws of change of the control object entropy in conditions of the control information absence and the control information availability necessary to make. It should take into consideration that the control object entropy value and the control information amount reaches a certain limit value. The model should give the opportunity to take into account the basic radio characteristics of the control object channel.

Theoretical results. A dynamic model which takes into account the relationship between the rate of change of control object entropy and the amount of information that goes on the control channel was proposed. The constant rate of object entropy increase in the control absence and the constant rate of object entropy decrease in the control organization were considered. Restrictions on the potentially possible entropy values and the information amount were included. The steady state situation was analyzed. The time during which the control process can be accomplished was established. The requirement to the relation between the entropy potential value and the quantity of information was determined. The relation between the relative error of the radio control, the control object entropy value and the starting information was established.

Conclusion. The results make it possible to determine the pattern of the control object entropy change, both in terms of receipt control information, and if it is the reduction in a contingency situation. On the basis of the entropy analysis procedures set a limit on the relative radio control errors, required time and the maximum value of the control object entropy. Hourly and the entropy limit for the radio control process take account the radio control channel characteristics, channel bandwidth, signal power, noise power, and the relative error of control.

Keywords: radio control, entropy, information.